



Entwicklung eines Verfahrens für die Wirtschaftlichkeitsberechnung solarthermischer Anlagen: die LCOH Methode

Louvet, Y.; Fischer, S.; Furbo, Simon; Giovannetti, F.; Mauthner, F.; Mugnier, D.; Philippen, D.; Vajen, K.

Publication date:
2017

Document Version
Peer reviewed version

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Louvet, Y., Fischer, S., Furbo, S., Giovannetti, F., Mauthner, F., Mugnier, D., Philippen, D., & Vajen, K. (2017). *Entwicklung eines Verfahrens für die Wirtschaftlichkeitsberechnung solarthermischer Anlagen: die LCOH Methode*. Paper presented at 27. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Entwicklung eines Verfahrens für die Wirtschaftlichkeitsberechnung solarthermischer Anlagen: die LCOH Methode

Y. Louvet¹, S. Fischer², S. Furbo³, F. Giovannetti⁴, F. Mauthner⁵, D. Mugnier⁶,
D. Philippen⁷, K. Vajen¹

¹ Universität Kassel, Institut für thermische Energietechnik, DE-34109 Kassel
Tel.: +49 (0) 561 804 3890
solar@uni-kassel.de, www.solar.uni-kassel.de

² Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS), DE-70550 Stuttgart

³ Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering,
DK-2800 Kgs. Lyngby

⁴ Institut für Solarenergieforschung Hameln GmbH, DE-31860 Emmerthal

⁵ AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, AT-8200 Gleisdorf

⁶ TECSOL, FR-66000 Perpignan

⁷ Hochschule für Technik HSR, Institut für Solartechnik (SPF),
CH-8640 Rapperswil-Jona

1. Einleitung

Ende 2015 begann der Task 54 des Solar Heating and Cooling Programms der Internationalen Energieagentur (IEA-SHC Task 54), *Price reduction of solar thermal systems*. Ziele des Tasks sind Preissenkungspotenziale für solarthermische Anlagen zu identifizieren und Optimierungsmaßnahmen entlang der Wertschöpfungskette vorzuschlagen, um die solaren Wärmegegostehungskosten um bis zu 40 % zu reduzieren /1/. Kostensenkungen sind von entscheidender Bedeutung für die Branche, die seit einigen Jahren mit einem Rückgang des europäischen Marktvolumens konfrontiert ist. Im Rahmen des IEA-SHC Task 54 wurde daher ein transparentes Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung und eine Kennzahl entwickelt, um die Preissenkungspotenziale unterschiedlicher Lösungen miteinander vergleichen zu können.

Das im SHC Task 54 entwickelte Verfahren basiert auf dem Konzept der *Levelized Cost of Energy* (LCOE), einem Indikator der bereits im Jahr 1995 definiert und dokumentiert wurde /2/, bislang aber überwiegend im Stromsektor angewandt wird /3/, /4/. Im Rahmen des europäischen Projektes FROnT wurde dieses Verfahren auch für den Wärmebereich unter der angepassten Bezeichnung LCOH (*Levelized Cost of Heat*) eingeführt /5/. In den letzten Jahren wurde der LCOE/LCOH Ansatz auch im solarthermischen Bereich als Kennzahl angewandt. In der IEA-Solarthermie-Weltstatistik /6/ erfolgt bereits seit 2016 die Berechnung der LCOH für einige der wichtigsten Solarthermiemärkte weltweit. In einem Sub-Arbeitspaket des IEA-SHC Tasks 52, *Solar Heat and Energy Economics in Urban Environments*, wurde eine Vielzahl von vorwiegend in Mitteleuropa realisierter Solarthermieanlagen analysiert, um daraus techno-ökonomische Kennzahlen abzuleiten /7/. Im diesem Zuge wurden

ebenfalls die LCOH ermittelt. Ab der Version 9.1 hat die Simulationssoftware Polysun eine detaillierte LCOH Berechnung ebenfalls integriert /8/.

Trotz des gleichen Konzepts, unterscheiden sich die angewandten Berechnungsmethoden in der Regel. Darüber hinaus wird in der deutschsprachigen Literatur oft die Annuitätsmethode angewandt, ein anderes Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, das in der VDI-Richtlinie 6002 beschrieben ist /9/. Die Anwendung unterschiedlicher Verfahren mit teils unterschiedlichen Berechnungsansätzen führt leider zu einer sehr eingeschränkten Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien.

Im Rahmen dieses Beitrags wird im ersten Kapitel eine detaillierte Methodik vorgeschlagen, um die LCOH für Solarwärme zu berechnen. Dieses Verfahren wird in das folgende Kapitel auf zwei konkrete Beispiele angewandt. Im Anschluss wird die Bedeutung und Exaktheit der Ergebnisse durch eine Variation verschiedener Parameter kritisch betrachtet. Das letzte Kapitel zeigt den Zusammenhang zwischen der LCOH Berechnung und der Annuitätsmethode auf.

2. Berechnung der LCOH

Basierend auf den Ergebnissen des FROnT Projektes wurde im Rahmen des IEA-SHC Task 54 folgende Gleichung zur Bestimmung der LCOH für die Solarthermie angepasst:

$$LCOH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t(1 - TR) - DEP_t \cdot TR}{(1 + r)^t} - \frac{RV}{(1 + r)^T}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1 + r)^t}} \quad (1)$$

Mit:

<i>LCOH</i> : Levelized Cost of Heat in €/kWh	<i>DEP_t</i> : Jährliche Abschreibung auf die Investition in €
<i>I₀</i> : Investitionskosten in €	<i>RV</i> : Restwert in €
<i>S₀</i> : Förderungen in €	<i>E_t</i> : Jährlich eingesparte Endenergie oder Nutzwärmebedarf in kWh
<i>C_t</i> : Jährliche Instandhaltung und betriebsgebundenen Kosten in €	<i>r</i> : Diskontsatz in %
<i>TR</i> : Körperschaftsteuer in %	<i>T</i> : Betrachtungszeitraum in Jahren

In der deutschsprachigen Literatur findet man auch den Begriff der „diskontierten durchschnittlichen Wärmegestehungskosten“, um die LCOH zu beschreiben /4/. Da die Zahlungsreihen diskontiert werden ist das Verfahren eine dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung.

Es ist wichtig zu betonen, dass es grundsätzlich zwei verschiedene LCOH gibt – nominale und reale LCOH. Die Zahlungsreihen (*C_t*, *DEP_t* und *RV*) können entweder in laufenden oder in konstanten Werten angegeben werden. Der Diskontsatz muss

dementsprechend als nominalen oder realen (inflationsbereinigten) Wert verwendet werden. Infolgedessen ergeben sich unterschiedliche LCOH Werte. Die realen LCOH sind hierbei immer kleiner als die nominalen. Folgende Gleichung wird benutzt, um den realen Diskontsatz (r_{real}) von dem nominalen ($r_{nominal}$) abzuleiten, wobei i der Inflationsrate in %/a entspricht:

$$r_{real} = \frac{r_{nominal} - i}{1 + i} \quad (2)$$

Für Solarthermieanlagen können abhängig von der Fragestellung zwei verschiedene LCOH berechnet werden. Liegt der Fokus wie im Rahmen des SHC Task 54 eher auf dem Vergleich mehrerer Solartechnologien oder unterschiedlicher Anlagekonzepte untereinander, ist es ausreichend die LCOH für den „Solarteil“ des Heizungssystems zu berechnen. In diesem Fall brauchen nur die Kosten betrachtet werden, die sich auf die Solaranlage beziehen. Diese LCOH ermöglicht auch die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Solaranlage im Vergleich zum konventionellen ersetzten Energieträger. Um die gesamte solarunterstützte Heizungsanlage mit anderen Technologien wie z.B. Wärmepumpen oder Holzpelletkesseln vergleichen zu können, müssen die Kosten der gesamten Heizungsanlage berücksichtigt werden. In diesem Beitrag werden die beiden Fälle durch die Unterscheidung zwischen „LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme“ und den „LCOH der durch das solarunterstützte Heizungssystem erzeugten Wärme“ voneinander abgegrenzt. Die Unterschiede zwischen beiden LCOH sind in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Unterschiede und Anwendungsfälle der beiden LCOH.

	LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme	LCOH der durch das solarunterstützte Heizungssystem erzeugten Wärme
Kostenparameter (Gleichungszähler)	nur Komponenten die zum Solar Kollektorkreis oder seiner Integration gehören	alle Komponenten der Heizungsanlage
Bezugsenergie (Gleichungsnenner)	eingesparte Endenergie	Nutzwärmebedarf
Anwendung	Vergleich verschiedene Solartechnologien / Anlagekonzepte untereinander; Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum konventionellen ersetzten Energieträger	Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu anderen Heizungstechnologien

Die Methode, die im Rahmen des SHC Task 54 entwickelt wurde, ist auf die „LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme“ fokussiert. Dies bedeutet, dass sich alle Kosten (I_0 , S_0 , C_t , DEP_t und RV) ausschließlich auf die Komponenten beziehen, die für Solarwärmeerzeugung und Speicherung benötigt werden. Im Folgenden wird die Methode detailliert dargestellt.

Für die Berechnung ist zunächst die Definition eines konventionellen Referenzheizungssystems erforderlich. Dieses Referenzsystem beschreibt ein theoretisches Heizungssystem, welches denselben Nutzwärmebedarf decken muss, wie das solarthermisch unterstützte Heizungssystem. Dies ist nötig, um I_0 und E_t zu berechnen.

Die einzelnen Terme der Gleichung (1) werden mit folgenden Annahmen berechnet:

Die Kosten für den Speicher des Referenzsystems und die entsprechenden Installationskosten werden vom I_0 der Solaranlage abgezogen. Die Größe des Speichers des Referenzsystems ist stark anwendungsabhängig. Als Richtlinien für seine Dimensionierung können z.B. die Methoden von CEN /10/ für die Warmwasserbereitung angewandt werden. Für gebäudeintegrierte Solaranlagen müssen gegebenenfalls auch die Kosten der ersetzten Gebäudehülle (Dach- oder Wandabschnitte) sowie deren Installationskosten abgezogen werden. Potentielle Förderungen S_0 können in die Berechnung integriert werden, dies muss aber zur Wahrung der Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit explizit erwähnt werden.

Betriebsgebundene- und Instandhaltungskosten müssen separat betrachtet werden ($C_t = O_t + M_t$). Zur Vereinfachung können O_t und M_t als zeitunabhängig (O und M) angenommen werden. Nach der VDI 6002 liegen die jährlichen Instandhaltungskosten M für Solaranlagen in der Regel zwischen 1 % und 2 % der anfänglichen Investitionskosten I_0 /9/. Für genauere Berechnungen kann auch die VDI-Richtlinie 2067 genutzt werden /11/. Die betriebsgebundenen Kosten O beinhalten den Stromverbrauch zum Betrieb der Pumpen und Steuerungsgeräte. Deren Laufzeiten sollen durch numerische Simulationen berechnet werden. Eine Berücksichtigung der möglichen jährlichen Strompreiserhöhungen wird mit $O_t = O_1 \cdot (1 + j)^{t-1}$ beschrieben, wobei O_1 die betriebsgebundenen Kosten im ersten Jahr sind und j der jährlichen Preissteigerung in % entspricht. Sollten die übrigen Kostenvariablen mit konstanten Werten angegeben sein, muss der Preissteigerungssatz nach Gleichung (2) um die Inflationsrate korrigiert werden.

Die beiden Terme TR und DEP_t betreffen nur industrielle und gewerbliche Unternehmen, da für diese die steuerliche Abschreibung einer Anlage eine wichtige Rolle zur Berechnung der LCOH spielt. 2016 betrug die Körperschaftssteuer TR in Deutschland 30,18 % /12/. Die Abschreibungsdauer einer Solarthermieanlage ist in der entsprechenden AfA-Tabelle vorgegeben und beträgt derzeit 10 Jahre /13/. Die Abschreibung muss nach § 7 EStG im Regelfall gleichmäßig über den gesamten Zeitraum erfolgen (lineare Abschreibung).

Der Restwert RV solarthermischer Anlagen wird meist, insbesondere im Haushaltssektor, als Null betrachtet. Um RV zu berechnen, müssen die technische Lebensdauer der verschiedenen Komponenten mit dem Betrachtungszeitraum vergli-

chen werden. Typische Werte zur Lebensdauer können in der Literatur z.B. in /11/ und /14/ gefunden werden.

Ein fairer Vergleich verschiedener Solartechnologien und Anlagenkonzepte wird erreicht, wenn sich die LCOH auf die eingesparte Endenergie und nicht auf den Solarertrag bezieht. Die eingesparte Endenergie wird mit folgender Gleichung berechnet /10/:

$$E_t = E_{conv} - E_{aux} = \frac{Q_{conv,net}}{\eta_{conv}} - \frac{Q_{aux,net}}{\eta_{aux}} = \frac{Q_d + Q_{l,conv}}{\eta_{conv}} - \frac{Q_{aux,net}}{\eta_{aux}} \quad (3)$$

Mit:

E_{conv} : Endenergieverbrauch des Referenzheizungssystems in kWh

E_{aux} : Zusatzendenergieverbrauch des Solarheizungssystems in kWh

$Q_{conv,net}$: netto-Energieverbrauch¹ des Referenzheizungssystems in kWh

$Q_{aux,net}$: netto-Zusatzenergieverbrauch des Solarheizungssystems in kWh

Q_d : gesamter Nutzwärmebedarf in kWh

$Q_{l,conv}$: Wärmeverluste des Speichers des Referenzheizungssystems in kWh

η_{conv} : jährlicher Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers im Referenzheizungssystem

η_{aux} : jährlicher Nutzungsgrad des zusätzlichen Wärmeerzeugers im Solarheizungssystem

Die Nutzungsgrade der Wärmeerzeuger beider Systeme sind stark von deren Betriebsbedingungen abhängig. Im Interesse einer erhöhten Anwenderfreundlichkeit der LCOH Formel sollte aber $\eta_{conv} = \eta_{aux}$ als Vereinfachung angenommen werden. Im Rahmen des SHC Task 54 wurden länder- und referenzsystemabhängige Werte für $\eta_{conv} = \eta_{aux}$ ermittelt. Mit den genannten Annahmen lautet die eingesparte Endenergie:

$$E_t = \frac{Q_d + Q_{l,conv} - Q_{aux,net}}{\eta_{conv}} \quad (4)$$

Q_d und $Q_{aux,net}$ werden mit einer einzigen Simulation des Solarheizungssystems ermittelt. $Q_{l,conv}$ kann entweder theoretisch berechnet, mit Hilfe von Literaturwerten /10/ angenähert, oder durch eine zweite Simulation ohne Verwendung der Solaranlage ermittelt werden. Bei einer erneuten Simulation muss die Speichergröße sinnvoll angepasst werden.

Wenn die LCOH nicht für die Solaranlage, sondern für das solarunterstützte Heizungssystem berechnet werden soll, dann ist die Bezugsenergie E_t nicht mehr die eingesparte Endenergie sondern der Gesamtnutzwärmebedarf Q_d .

Der Diskontsatz r entspricht normalerweise den gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten (WACC). Im Einfamilienhausbereich werden die Kosten einer Anlage in der Regel aus vorhandenen Ersparnissen bezahlt. Daher ist der Diskontsatz in diesem

¹ Nach /10/. In dieser Norm ist der Endenergieverbrauch E_{conv} als Brutto-Energiebedarf bezeichnet.

Fall gleich null (realer Diskontsatz). Schließlich muss ein Betrachtungszeitraum T gewählt werden, der in der Regel die technische Lebensdauer der Anlage umfasst. In Deutschland werden für Anlagen im Haushaltsbereich oft 20 bis 25 Jahre genutzt, in der Schweiz sind es 25 Jahre. In Dänemark liegt der Standardwert für solare Fernwärmeanlagen bei 30 bis 35 Jahren. Eine Alternative wäre hier auch die Betrachtung der wirtschaftlichen Lebensdauer anstelle der technischen.

Als Beispiele für die Anwendung der LCOH wurden zwei Solaranlagen in Deutschland betrachtet: eine Trinkwarmwasser- (TWW) und eine Kombianlage für ein Einfamilienhaus. Die detaillierten Annahmen für die Berechnungen wurden in /15/ und /16/ vorgestellt und sind in Tabelle 2 zusammen mit den Ergebnissen dargestellt. Die Anlagen wurden für den Standort Würzburg ($I_T = 1.230 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$, $\overline{T_a} = 9.0 \text{ °C}$) mit einem festen Kesselnutzungsgrad (η_{conv}) von 0,9 in TRNSYS simuliert. Für die folgenden Berechnungen sind alle Kosten ohne Mehrwertsteuer angegeben (19 %) und die Förderungen nicht berücksichtigt um Vergleiche auf internationaler Ebene zu erlauben. Die Inflation wird auch nicht berücksichtigt (reale LCOH). Die Kosten wurden anhand aktueller BAFA-Daten für die Jahre 2015-2016 ermittelt. Aktuelle (2016) Strom- und Fossilenergieträgerpreise sowie deren zukünftige Steigerungsraten wurden aus amtlichen Statistiken abgeleitet. Für Strom wurde ein Preis von 24,9 €/ct/kWh (ohne MwSt.) mit einer Preissteigerungsrate von 2,6 %/a angenommen. Die Steigerungsrate entspricht dem inflationsbereinigten Durchschnittswerte der Jahre 2010 bis 2016 /17/, /18/. Analog wurden für den Gaspreis ein Wert von 5,6 €/ct/kWh (ohne MwSt.) und eine jährliche inflationsbereinigte Preissteigerung von 1,4 % angenommen.

Tabelle 2: Hauptannahmen und Ergebnisse der LCOH Berechnung (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) für eine Trinkwarmwasser- und eine Kombianlage in Würzburg. Alle Kosten ohne Mehrwertsteuer.

		Einheit	Trinkwarmwasseranlage		Kombianlage	
			L-Profil	M-Profil	L-Profil	M-Profil
TWW Bedarf		kWh/a	4.254	2.133	4.254	2.133
Heizungsbedarf		kWh/a	-		9.090	
I_0		€	4.850		10.000	
Speichergutschrift		€	1.000			
S_0		€	0			
r		%/a	0			
T		Jahre	20			
C_1	Gesamte	€/a	116	113	221	219
	Instandhaltung		97		200	
	Stromverbrauch		19	16	21	19
E_t		kWh/a	2.162	1.570	3.323	2.530
$LCOH$		€/ct/kWh	14,5	19,7	20,4	26,6

Zwei verschiedene Trinkwarmwasserverbrauchsprofile – „Large“ (L) und „Medium“ (M) – wurden nach /19/ definiert und für die Berechnungen betrachtet. Wie zu erwarten war, hat das Verbrauchsprofil einen starken Einfluss auf die LCOH, die mit zunehmendem Warmwasserverbrauch sinken. Die Ergebnisse können dazu verwendet werden, um die LCOH anderer Solaranlagenkonzepte, die entsprechend abweichende Kosten und Energieerträge aufweisen, für den gleichen Nutzwärmeverbrauch vergleichen zu können.

Die LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme erlaubt ebenfalls eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Solaranlage im Vergleich zum konventionellen ersetzten Energieträger. Dafür ist die zusätzliche Berechnung der diskontierten, durchschnittlich eingesparten Zusatzenergiekosten $\overline{p_{conv}}$ erforderlich. Hierfür wird Gleichung (5) benutzt, wobei $p_{conv,1}$ für die aktuellen Zusatzenergiekosten steht und j deren erwarteten jährlichen Preissteigerungssatz darstellt. Wenn $LCOH \leq \overline{p_{conv}}$ ist, ist die Installation der Solaranlage wirtschaftlich sinnvoll. Da es sich bei der Preissteigerungsrate der Zusatzenergie um eine entscheidende Annahme handelt wird empfohlen, hierfür verschiedene Szenarien zu berücksichtigen /9/.

$$\overline{p_{conv}} = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{p_{conv,1} \cdot (1+j)^{t-1}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

Für die in Tabelle 2 beschriebenen TWW- und Kombianlagen wurde die Wirtschaftlichkeit für den deutschen Markt beurteilt. Dafür wurden alle Kosten mit einer Mehrwertsteuer von 19 % und aktuellen Förderungen des BAFA-Programms im Höhe von 500 € (TWW-Anlage) und 2.100 € (Kombianlage) betrachtet /20/. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse.

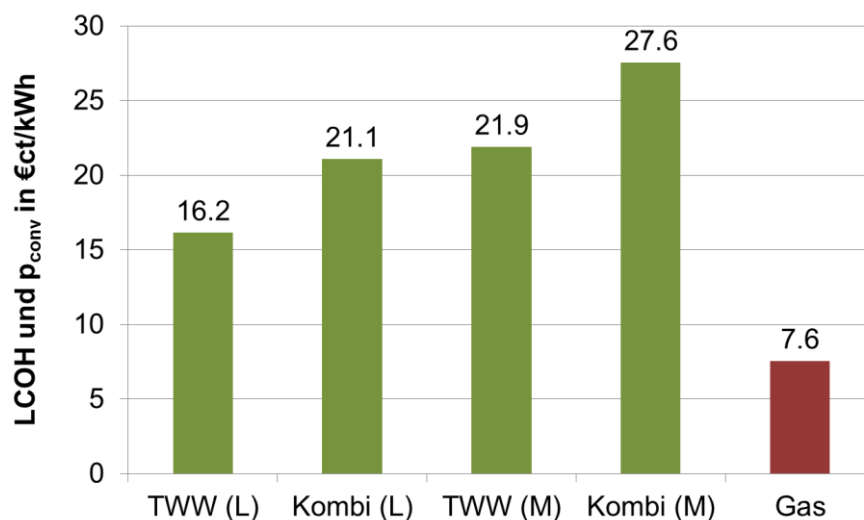


Abbildung 1: LCOH (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) für die in Tabelle 2 beschriebenen Anlagen, unter Berücksichtigung der MwSt. und der Förderungen, sowie den diskontierten, durchschnittlich eingesparten Gaskosten $\overline{p_{conv}}$ (über 20 Jahre, inkl. MwSt.).

Im besten der berechneten Fälle (solare Trinkwarmwasseranlage mit L-Profil) wird der Break-even-Punkt bei einer jährlichen Gaspreissteigerung von 8,6 % erreicht ($\overline{p_{conv}} = LCOH = 16,2 \text{ €ct/kWh}$). Dieses Szenario ist eher unwahrscheinlich, verdeutlicht aber, dass basierend auf der LCOH Berechnung ein Bedarf für eine deutliche Kostensenkung für Solarthermieanlagen besteht. Mit der angenommenen Gaspreissteigerung (1,4 %/a) beläuft sich $\overline{p_{conv}}$ über 20 Jahre auf 7,6 €ct/kWh (inkl. MwSt.). Um unter dieser Randbedingung den Break-even-Punkt zu erreichen würde unter der Annahme, dass alle anderen Parameter gleich bleiben entweder eine Reduzierung des Endkundenpreises der Solaranlage auf 1.727 € zzgl. MwSt. (-64 %), oder aber eine Erhöhung der eingesparten Endenergie auf 4.621 kWh/a (+114 %) benötigt. Diese Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung der Mehrwertsteuer und der Förderungen berechnet.

3. Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der LCOH Berechnungen sind sehr sensitiv bezogen auf die getroffenen Annahmen. Die Sensitivität der einzelnen Parameter auf das Ergebnis der LCOH wurde für die in Tabelle 2 beschriebene Trinkwarmwasseranlage (L-Profil) berechnet (Abbildung 2). Alle Werte wurden wie in Tabelle 2 angenommen, nur der Diskontsatz wurde mit 3 %/a angesetzt. Der absolute LCOH Referenzwert beläuft sich in diesem Fall auf 17,6 c€/kWh.

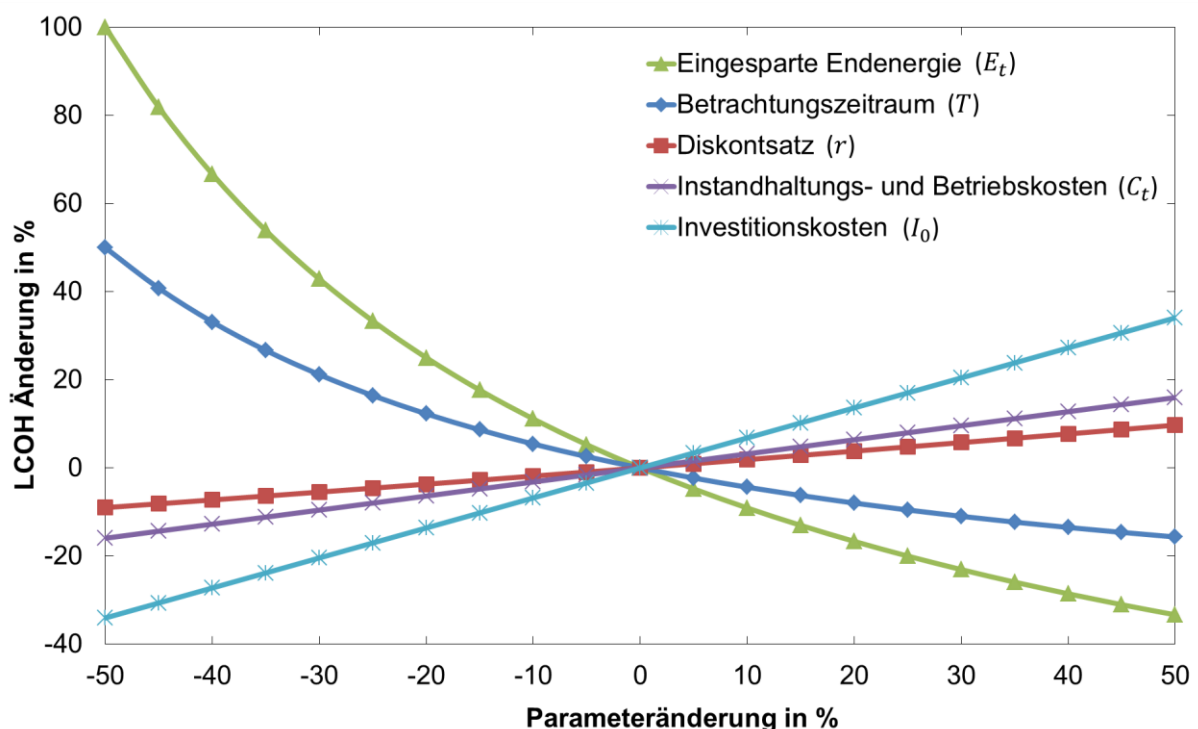


Abbildung 2: Einfluss einzelner Terme auf die LCOH (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) am Beispiel der in Tabelle 2 beschriebene Solartrinkwarmwasseranlage (L-Profil) mit $r = 3 \text{ %/a}$. Mehrwertsteuer und Förderungen wurden nicht berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die Nichtlinearität der Abhängigkeit für die eingesparte Endenergie E_t und den Betrachtungszeitraum T viel stärker ist als die für den Diskontsatz r .

Allgemein haben die eingesparte Endenergie E_t , die Investitionskosten I_0 und der Betrachtungszeitraum den größeren Einfluss auf die LCOH. Das Ziel des SHC Task 54 ist Vorschläge für eine Absenkung der LCOH um bis zu 40 % zu präsentieren. Die Abbildung ist daher hilfreich um zu zeigen, wie diese Vorgabe erreichen werden kann. Ein Beispiel für die Vielzahl der Möglichkeiten zur Erfüllung der Zielvorgabe ist eine Senkung der Investitionskosten I_0 und der Instandhaltungskosten sowie betriebsgebundene Kosten C_t um 30 % gekoppelt mit einer Steigerung der eingesparten Endenergie E_t zwischen 10 und 15 %.

Für die gleiche Anlage kann nach Gleichung (1) auch den Effekt der Abschreibung berechnet werden. In diesem Fall handelt es sich nur um eine rein theoretische Betrachtung, da private Haushalte ihre Anlage nicht abschreiben können. Unter den sonst gleichen Annahmen für die Abschreibung aus Kapitel 2, würde die LCOH um 12,0 €/kWh (-32 %) sinken. Auch die Abschreibungsdauer hat einen Einfluss, allerdings nimmt dieser mit sinkendem Diskontsatz ab. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse.

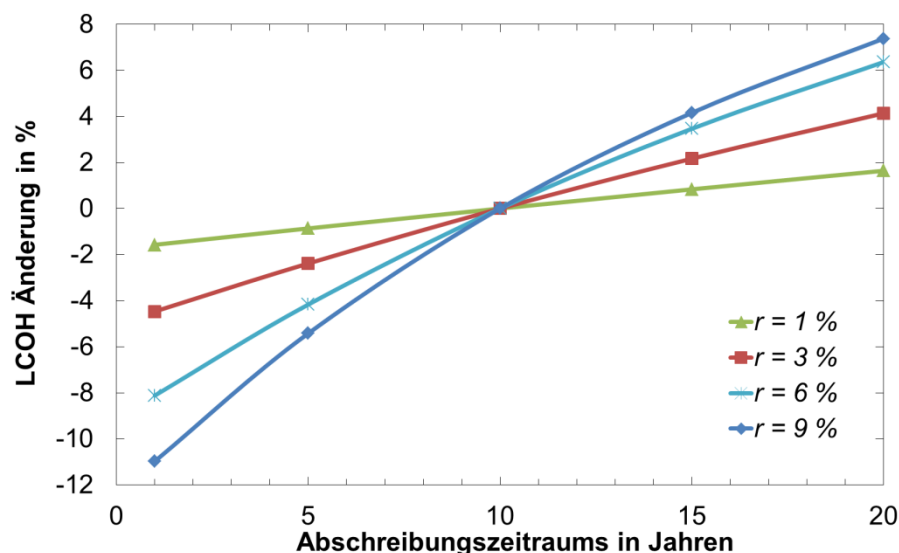


Abbildung 3: Einfluss des Abschreibungszeitraums auf die LCOH (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) für verschiedene Diskontsätze am Beispiel der in Tabelle 2 beschriebene Solartrinkwarmwasseranlage (L-Profil). Die LCOH für einen Abschreibungszeitraum von 10 Jahre wurden als Referenz angenommen. Mehrwertsteuer und Förderungen wurden nicht berücksichtigt.

In der LCOH Berechnung ist die Energie, auf die die Berechnungen bezogen werden (E_t) wichtig, um Ergebnisse vergleichen zu können. In zwei anderen Publikationen des IEA SHC Programms wurden andere Bezugsenergien verwendet. Im Bericht zur Solarthermie-Weltstatistik basiert die Berechnung der LCOH auf den simulierten Brutto-Kollektorserträgen (Q_{sol}) /6/. Für den SHC Task 52 wurden ebenfalls die solaren Wärmegegestehungskosten (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) ermittelt, basierend auf real gemessenen solaren Erträgen. Für die beiden in Tabelle 2 beschriebenen Fälle wurden die Berechnungen zusätzlich auf Basis der Brutto-

Kollektorerträge anstelle der eingesparten Endenergie durchgeführt. Tabelle 3 stellt die Ergebnisse gegenüber. Sie zeigen vor allem, wie wichtig es ist die Bezugsenergie anzugeben wenn LCOH Werte berechnet und dargestellt werden, da der Einfluss auf das Ergebnis erheblich ist. Zudem sind die Abweichungen zwischen den verschiedenen Fällen so hoch, dass die Kenntnis eines der Werte keine Abschätzung für die anderen Werte erlaubt. Die mit Q_{sol} berechneten LCOH sind deutlich niedriger als die, die mit der eingesparten Endenergie berechnet wurden. Allerdings sind die Berechnungsergebnisse mit Q_{sol} mit Vorsicht zu betrachten, da die Speicherverluste und der Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers nicht berücksichtigt sind.

Tabelle 3: Relative Abweichung der LCOH (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) für die Trinkwarmwasser- und Kombianlagen aus Tabelle 2 bei Verwendung zweier verschiedener Bezugsenergien. Mehrwertsteuer und Förderungen wurden nicht berücksichtigt.

	Einheit	Trinkwarmwasseranlage		Kombianlage	
		L-Profil	M- Profil	L-Profil	M- Profil
LCOH, E_t = eingesparte Endenergie	€/kWh	14,5	19,7	20,4	26,6
Q_{sol}	kWh/a	2.293	1.915	4.423	3.848
LCOH, $E_t = Q_{sol}$	€/kWh	13,7	16,2	15,3	17,5
$\Delta LCOH$	%	-5,7	-18,0	-24,9	-34,3

Wie im Kapitel 2 bereits erwähnt gibt es auch die Möglichkeit, die LCOH anhand der Wärme die durch das solarunterstützte Heizungssystem erzeugt wurde, zu berechnen. Dies erlaubt die Wärmegestehungskosten der ganzen solarunterstützten Anlage mit den Wärmegestehungskosten anderen Heizungstechnologien zu vergleichen. Diese wurde beispielweise für die Fälle aus Tabelle 2 mit jeweils gleichem Heizungs- und Warmwasserbedarf (E_t) berechnet und mit einer gasbetriebenen konventionellen Heizungsanlage verglichen. Die Annahmen und Ergebnissen sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 4: Hauptannahmen und Ergebnisse der LCOH Berechnung (der durch das Heizungssystem erzeugten Wärme) für eine konventionelle gasbetriebene Heizungsanlage in Würzburg. Alle Kosten inkl. MwSt. (19 %).

		Einheit	L-Profil	M-Profil
I_0		€	7.735	
r		%/a	0	
S_0		€	0	
T		Jahre	20	
C_1	Gesamte	€/a	1.484	1.326
	Brennstoff		1.021	862
	Stromverbrauch		71	72
	Instandhaltung und Gaszähler		393	
E_t		kWh/a	13.344	11.223
$LCOH$		€/kWh	15,3	16,6

Tabelle 5: Hauptannahmen und Ergebnisse der LCOH Berechnung (der durch das solarunterstützte Heizungssystem erzeugten Wärme) für eine Trinkwarmwasser- und eine Kombianlage in Würzburg. Alle Kosten inkl. MwSt. (19 %).

		Einheit	Trinkwarmwasseranlage		Kombianlage	
			L-Profil	M-Profil	L-Profil	M-Profil
I_0		€	$7.735 - 1.190 + 5.772 = 12.317$		$7.735 - 1.190 + 11.900 = 18.445$	
r		%/a	0			
S_0		€	500		2.100	
T		Jahre	20			
C_1	Gesamte	€/a	1.457	1.333	1.503	1.395
	Brenn.		878	758	801	695
	Strom.		95	90	95	93
	Instand.		484		607	
E_t		kWh/a	13.344	11.223	13.344	11.223
$LCOH$		€/kWh	16,5	18,4	18,5	20,9

Dieses Vorgehen spiegelt auch die Mehrkosten der Anlage mit Solarunterstützung im Vergleich mit dem konventionellen System wider. Mit Blick auf die Ergebnisse für die TWW-Anlage (L-Profil) verursacht die Solarheizungsanlage verglichen mit einer konventionellen Gasheizungssystem 8 % höhere LCOH bezogen auf die Wärmemenge, die das solarunterstützte Heizungssystem bereitstellt (16,5 €/kWh statt 15,3 €/kWh). Betrachtet man nur die LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme, liegt die 114 % höher als die Zusatzenergiekosten (16,2 €/kWh statt 7,6 €/kWh). Dieser drastische Unterschied der Ergebnisse zeigt noch einmal, dass Angaben zu den LCOH sehr vorsichtig zu betrachten sind und dass es sehr wichtig ist, die Berechnungsannahmen klar und eindeutig darzustellen.

4. Zusammenhang zwischen LCOH und Annuitätsmethode

Die Annuitätsmethode ist eine andere Vorgehensweise, um Wärmegestehungskosten dynamisch zu berechnen /4/. Diese ist in den VDI-Richtlinien 6025 /21/ und 2067, Blatt 1 /11/ detailliert beschrieben. Im Bereich der Solarthermie, nimmt diese Berechnung auch einen wesentlichen Anteil der VDI 6002, Blatt 1 /9/ ein und basiert auf den beiden oben erwähnt Richtlinien. Allerdings werden in der VDI 6002 abweichende, wenn auch ähnliche, Bezeichnungen für die Variablen verwendet, was zu Verwirrungen führen kann. Zusätzlich wurde in der VDI 6002 die Gleichung für den preisdynamischen Barwertfaktor nicht korrekt wiedergegeben.

Die Annuitätsmethode basiert auf der Berechnung zweier unterschiedlicher Faktoren; dem Annuitätsfaktor a und dem preisdynamischen Barwertfaktor b , für den gilt (wenn $q \neq s$):

$$\sum_{t=1}^T \frac{s^{t-1}}{q^t} = \frac{1 - (s/q)^T}{q - s} = b \quad (6)$$

und (wenn $s = 1$):

$$\sum_{t=1}^T \frac{1}{q^t} = \frac{1 - q^{-T}}{q - 1} = \frac{1}{a} \quad (7)$$

Mit:

$q = 1 + r$, wobei r der Kalkulationszinssatz (oder Diskontsatz) ist

$s = 1 + j$, wobei j der jährlichen Preissteigerungssatz ist

Die Symbole der Gleichungen (6) und (7) wurden zugunsten einer einheitlichen Darstellung in diesem Beitrag angepasst. Die ursprünglichen Gleichungen sind im Anhang präsentiert.

Es gibt die Möglichkeit, die LCOH Gleichung (1) mit diesen zwei Faktoren umzuwandeln. Im Folgenden wird ein Beispiel für eine vereinfachte LCOH Gleichung (8) gezeigt (für $TR = DEP_t = S_0 = RV = 0$; $C_t = O_t + M_t$ mit $O_t = O_1 \cdot (1 + j)^{t-1}$ und $M_t = M_1$ für $t = [1..T]$; und $E_t = E_1$ für $t = [1..T]$):

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{O_1(1+j)^{t-1}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{M_1}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_1}{(1+r)^t}} \quad (8)$$

$$LCOH = \frac{I_0 + O_1b + M_1/a}{E_1/a} = \frac{I_0a + O_1ba + M_1}{E_1} \quad (9)$$

Der Zähler der Gleichung (9) (rechts) stellt eine negative Gesamtannuität der Heizungsanlage nach VDI 6025 dar. Ein weiterer Vergleich zeigt, dass die $LCOH$ dem Wärmepreis p und E_1 dem durchschnittlichen Wärmeenergiebedarf Q_a dieser Richtlinie entsprechen. Aus diesem Grund ähnelt der Wärmepreis p der $LCOH$ der durch das solarunterstützte Heizungssystem erzeugten Wärme. In der VDI 6002 liegt der Fokus auf die Wärme, die durch Solarenergie ersetzt wird. In dieser Richtlinie entspricht der Nenner $Q_{sol,nutz}$ (E_1 in der LCOH Gleichung)² den jährlichen solaren Nutzenergieertrag. Die Kosten (k_{sol}) für die Erzeugung dieser Nutzwärme durch die Solaranlage werden mit den Kosten (k_{konv}) verglichen, die entstehen würden, wenn diese Wärmemenge mit konventionellen Energieträgern erzeugt würde. Mit diesem Ansatz sind allerdings die Speicherverluste der konventionellen Anlage nicht berücksichtigt. Dies hat einen starken Einfluss auf die LCOH Werte, wie die Ergebnisse aus Tabelle 6 zeigen.

² Q_{sol} in der VDI 6002, hier aber in $Q_{sol,nutz}$ umbenannt um Verwechslungen mit dem Kollektorertrag zu vermeiden.

Tabelle 6: Relative Abweichung der LCOH (der durch Solarenergie ersetzten Wärme) für die Trinkwarmwasser- und Kombianlagen aus Tabelle 2 bei Verwendung zweier verschiedener Bezugsenergien. Mehrwertsteuer und Förderungen wurden nicht berücksichtigt; $\eta_{conv} = 0,9$.

	Einheit	Trinkwarmwasseranlage		Kombianlage	
		L-Profil	M- Profil	L-Profil	M- Profil
LCOH, $E_t =$ eingesparte Endenergie	€ct/kWh	14,5	19,7	20,4	26,6
$Q_{sol,nutz}$	kWh/a	1.373	880	2.418	1.744
LCOH, $E_t = Q_{sol,nutz}/\eta_{conv}$	€ct/kWh	20,6	31,7	25,2	34,8
$\Delta LCOH$	%	41,7	60,6	23,7	30,6

Dieser Vergleich zeigt auf, dass die Annuitätsmethode und die LCOH Methode auf der gleichen Grundlage basieren, nur unterschiedlich dargestellt werden. Abhängig von den Annahmen, die für die Berechnungen der Gesamtannuität und insbesondere der Bezugsenergie berücksichtigt werden, können sich die Ergebnisse zwischen beiden Methoden jedoch erheblich unterscheiden. Die Unterschiede zwischen der Methode aus der VDI-Richtlinie 6002 und dem in diesem Paper beschriebenen Verfahren (Tabelle 6) heben diese Tatsache hervor. Im Folgenden wird auch aufgezeigt, wie die scheinbare Vereinfachung der Wärmegestehungskostengleichung mit der Annuitätsmethode in besonderen Fällen zur Fehleinschätzung führen kann.

Wie bereits erwähnt, wird für die Berechnung der LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme die eingesparte Endenergie (oder den solaren Nutzenergieertrag in der VDI 6002) und nicht der gesamte Nutzwärmebedarf betrachtet. In diesem Fall bedarf es manchmal der Berücksichtigung eines Degradationsterms der jährlich eingesparten Endenergie, durch den die Reduktion des Solarertrages durch Alterungseffekte über den Nutzungszeitraum berücksichtigt wird. Mit einem Degradationsterm der Form $E_t = E_1 \cdot (1 + j_E)^{t-1}$, ($j_E < 0$), kann ein äquivalenter „dynamischer Faktor“ b_E nach (6) definiert werden. Alle anderen Annahmen bleiben im Vergleich zu Gleichung (9) unverändert. Mit dem genannten Ansatz für E_t verändert sich Gleichung (8) folgendermaßen:

$$LCOH = \frac{I_0 + O_1 b + M_1/a}{E_1 b_E} = \frac{I_0 a + O_1 b a + M_1}{E_1 b_E a} \quad (10)$$

Die Degradation des Ertrages wird in der VDI 6002 nicht berücksichtigt, sodass im Nenner lediglich nur $Q_{sol,nutz}$ eingesetzt wird. Gleichung (10) zeigt aber, dass der Ersatz von $Q_{sol,nutz}$ mit der allgemeineren Formulierung $Q_{sol,nutz,1} b_E a$, wobei $Q_{sol,nutz,1}$ dem solaren Nutzenergieertrag im ersten Jahr entspricht, mögliche Fehler bei der Anwendung der Richtlinie vermeiden könnte. Gleichung (9) ist ein Sonderfall von (10) mit $j_E = 0$.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die LCOH-Methodik, die auch im Rahmen des SHC Task 54 für Wirtschaftlichkeitsberechnung von Solaranlagen angewandt wurde, detailliert vorgestellt. Alle Terme der Gleichung wurden dargestellt und diskutiert. Die Möglichkeit zwei verschiedene LCOH in Abhängigkeit der jeweiligen Systemgrenzen zu berechnen wurde erläutert. Um das Verständnis zu erhöhen, wäre es sinnvoll, zukünftig zwei verschiedene Beschreibungen zu haben, um beide LCOH klar unterscheiden zu können.

Die Beispielberechnungen der LCOH für die beiden definierten solarthermischen Referenzanlagen in Deutschland zeigen die derzeitigen hohen Mehrkosten von Standard-Solarsystemen im Einfamilienhausbereich verglichen mit einer konventionellen Wärmeversorgung mit fossilen Energien. Die LCOH der durch Solarenergie ersetzten Wärme für die beiden Systeme bei Berücksichtigung der MwSt. und der Förderungen variiert in Abhängigkeit von Anwendung und Verbrauch zwischen 16,2 und 27,6 €/kWh, die diskontierten durchschnittlichen Gaskosten betragen dagegen nur 7,6 €/kWh. Bei den heutigen Gaspreisen wären daher weitere erhebliche Kostensenkungen und Leistungssteigerungen erforderlich um den Break-even-Punkt zu erreichen. Die Methode könnte auch um vernünftiger Zuschussbedarf abzuleiten benutzt werden.

Die durchgeführten Parametervariationen haben die hohe Bedeutung einer einheitlichen, detaillierten Berechnungsmethode aufgezeigt. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Bezugsenergie, die Betrachtung der Abschreibung und die gewählte LCOH Methode einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis und seine Interpretation haben.

Der detaillierte Vergleich der Annuitätsmethode und der LCOH Methode hat gezeigt, dass beide auf der identischen Grundlage beruhen. Die erste ist rechnerisch leichter zu implementieren, dafür ist jedoch das Risiko größer, Fehler bei der Berechnung zu begehen. Insbesondere bei der Nutzung eines jährlichen Degradationsterms im Nenner der Gleichung ist Vorsicht geboten. Die Nutzung der LCOH vermeidet dieses Problem. Außerdem ist der Begriff „diskontierte durchschnittliche Energie“ weit in der Energiebranche verbreitet, was zu einer besseren Sichtbarkeit der LCOH außerhalb der Solarbranche beitragen kann.

Aus diesem Grund sind auch über die Nutzung der LCOH innerhalb des IEA-SHC Task 54 hinaus einige Ergebnisse zu erwarten. Die Etablierung des Verfahrens und die LCOH als „Standard“ in der Branche würden u.a.:

- mehr Transparenz für die Berechnung der Wärmekosten solarthermischer Systemen bringen

- unterschiedliche Systemkonfigurationen einfacher vergleichbar machen
- den Einfluss von Kostenfaktoren auf die Wärmekosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette und über die gesamte Lebensdauer einer Anlage verdeutlichen.

6. Danksagung

Der erste Autor wurde durch das Marie-Curie Actions - Initial Training Network Forschungsprogramm der europäischen Union im Rahmen des SolNet-SHINE Projektes gefördert.

7. Literatur

- /1/ IEA-SHC, 2017. URL: <http://task54.iea-shc.org/> (Zugang 20.01.2017).
- /2/ Short, W., Packey, D.J., Holt, T., 1995. A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. No. NREL/TP-462-5173. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA.
- /3/ Kost, C., Mayer, J.N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., Nold, S., Lude, S., Saad, N., Schlegl, T., 2013. Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. Fraunhofer ISE, Freiburg, Deutschland.
- /4/ Konstantin, P., 2013. Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 3. aktualisierte Aufl. Springer Vieweg, Berlin, Deutschland.
- /5/ Baez, M.J., Larriba Martínez, T., 2015. Technical Report on the Elaboration of a Cost Estimation Methodology. No. D.3.1. Creara, Madrid, Spanien.
- /6/ IEA-SHC, 2016. Solar Heat Worldwide. URL: <http://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide> (Zugang 10.14.2016).
- /7/ Mauthner, F., Herkel, S., 2016. Technology and demonstrators - Technical Report Subtask C – Part C1. AEE Intec, Gleisdorf, Österreich.
- /8/ Vela Solaris, 2016. Polysun – Benutzerhandbuch.
- /9/ VDI, 2014. VDI 6002, Blatt 1 - Solare Trinkwassererwärmung Allgemeine Grundlagen Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, Deutschland.
- /10/ CEN, 2012. EN 12977-2:2012 Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 2: Test methods for solar water heaters and combisystems. European Committee for Standardization (CEN), Brüssels, Belgien.
- /11/ VDI, 2012a. VDI 2067, Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, Deutschland.
- /12/ OECD, 2016. Table II.1. Corporate income tax rate. URL: <http://stats.oecd.org//Index.aspx?QueryId=58204> (Zugang 26.01.2017).
- /13/ BMF, nd. AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter („AV“).
- /14/ Suter, J.-M., Kovács, P., Hausner, R., Visser, H., Peter, M., 2003. Durability and reliability of solar combisystems, in: Weiss, W. (Hrsg.), Solar Heating Systems for Houses - A Design Handbook for Solar Combisystems. Solar Heating and Cooling Executive Committee of the International Energy Agency (IEA), London, UK, pp. 163–190.

- /15/ Bachmann, S., Fischer, S., Hafner, B., 2017a. Reference solar domestic hot water system Germany - Info Sheet. IEA SHC - Task 54 Price Reduction of Solar Thermal Systems.
- /16/ Bachmann, S., Fischer, S., Hafner, B., 2017b. Reference solar combi system Germany - Info Sheet. IEA SHC - Task 54 Price Reduction of Solar Thermal Systems.
- /17/ Statistisches Bundesamt, 2017a. Preise Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Januar 2017. Destatis.
- /18/ Statistisches Bundesamt, 2017b. Verbraucherpreise. URL: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/Verbraucherpreise/VerbraucherpreiseKategorien.html?cms_gtp=145110_slot%253D2 (Zugang 03.17.2017).
- /19/ European Commission, 2013. Commission Delegated Regulation (EU) No 812/2013 Annex VII.
- /20/ BAFA, 2017. Basis- und Zusatzförderung. URL: http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Solarthermie/Gebaudebestand/Basis_Zusatzfoerderung/basis_zusatzfoerderung_node.html (Zugang 28.04.2017).
- /21/ VDI, 2012b. VDI 6025 - Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, Deutschland.

Anhang

Originale Formeln nach der VDI-Richtlinien 6025 und 2067 für den Annuitätsfaktor a und den preisdynamischen Barwertfaktor b (wenn $q \neq r$):

$$\sum_{t=1}^T \frac{r^{t-1}}{q^t} = \frac{1 - (r/q)^T}{q - r} = b$$

und (wenn $r = 1$):

$$\sum_{t=1}^T \frac{1}{q^t} = \frac{1 - q^{-T}}{q - 1} = \frac{1}{a}$$

Mit:

$q = 1 + i$, wobei i der Kalkulationszinssatz (oder Diskontsatz) ist

$r = 1 + j$, wobei j der jährlichen Preissteigerungssatz ist